Optimiser l'enrobage selon l'EC2 : application en France

François Toutlemonde
IFSTTAR
département Structures et Ouvrages d'Art

Journée technique CETE de Lyon – COTITA Centre-Est
« Concevoir, construire et gérer des structures durables en béton »,
Lyon, 15 novembre 2011

LCPC
Laboratoire Central
des Ponts et Chaussées
ISSN 1151-1516
techniques et méthodes
des laboratoires des ponts et chaussées
Guide technique
Structures en béton conçues avec l'Eurocode 2
Note technique sur les dispositions relatives à l'enrobage pour l'application en France

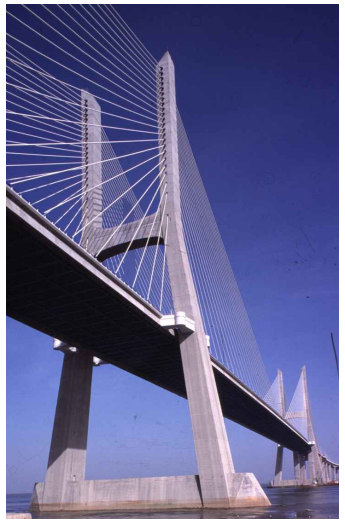
Présentation réalisée

Sur la base du guide technique préparé par F. Toutlemonde et A. Coin au nom de la commission BAEL/BPEL/EC2 Édité par le LCPC - nov. 2005

Historique

- **Réglementation française de 1906 à 2004**

  bonne permanence de la distinction de trois grandes catégories
  - ouvrages exposés à une atmosphère agressive ou en milieu marin
  - ouvrages exposés aux intempéries ou aux condensations
  - ouvrages dans des locaux couverts et non exposés aux condensations



- **Constance dans le temps des enrobages les plus faibles**

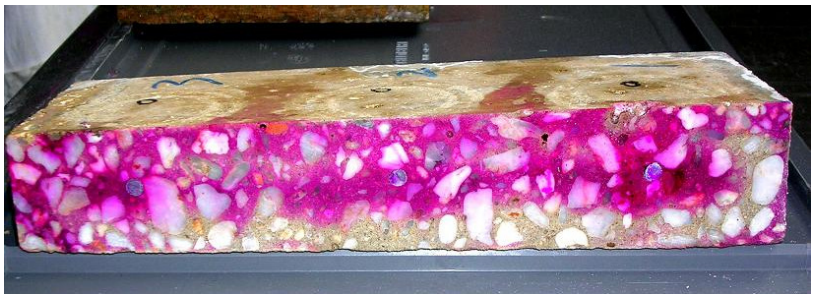
  soit 1 cm, dans le cas de la troisième catégorie

- **Augmentation des enrobages les plus forts**

  soit 5 cm actuellement, dans le cas de la première catégorie, sur la base d'une expérience croissante de structures en environnement très agressif

- **Calibrages récents**

  à l'occasion du développement des BHP et de recherches récentes sur les indicateurs de durabilité : mesures de profondeurs de carbonatation, pénétration de Cl^-, etc.



Principes du "passage aux Eurocodes"

- **Texte de l'Annexe Nationale inséparable de la section 4 de l'EN 1992**
  très peu de compléments nécessaires dans l'EN 1992-2 et -3 et leur A.N.

- **Recherche de cohérence avec l'EN 206-1 et son A.N.**
  nécessite **précisions sur les exemples informatifs liés aux classes d'exposition, qui sont alors rendus normatifs** (tableau 4.1 et notes, en plus du renvoi à l'EN 206 notamment tableaux NAF 1 et NAF 2)

- **Retenir l'essentiel des dispositions EU recommandées**
  - classe structurale S4, tableaux 4.4 et 4.5 inchangés ou très peu
  - moyennant des possibilités de modulations explicitées (tableau 4.3NF) pour tenir compte d'une démarche performantielle sur le béton
  - en explicitant les conditions de contrôle liées aux marges pour tolérances d'exécution

- **Objectifs des rédacteurs**
  - favoriser l'obtention de la durabilité par un choix équilibré entre l'épaisseur d'enrobage, la qualité du béton d'enrobage, et les dispositions complémentaires
  - inciter à un meilleur contrôle du positionnement des armatures

A noter

Autre aspect de l'EN 1992 lié à la durabilité et où l'enrobage intervient

le contrôle des ouvertures de fissure à l'ELS

(philosophie comparable à la notion de "fissuration préjudiciable" dans le BAEL, avec conséquences analogues)

- c'est l'objet de la section 7.3 de l'EN 1992
- **la valeur de l'enrobage intervient**, et aussi :
  - les caractéristiques du béton,
  - la géométrie du ferraillage,
  - et le taux de travail des aciers
- la limitation de la valeur w_{max} dépend des classes d'exposition :
  - **Tableau 7.1NF dans le cas général**
  - **Tableau 7.101NF pour les ponts**

Mode d'emploi de l'EN 1992 section 4

$$c_{min} = \max [c_{min,b} ; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add} ; 10\ mm]$$

$$\text{et } c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

- Données :

classes d'exposition (tableau 4.1 + notes AN)

classe structurale (4.4.1.2) associée à la D.U.P.

- Modulations connaissant le béton, l'élément, le projet :

classe structurale (référence S4) modulée par le tableau 4.3NF

- Détermination de l'enrobage minimum vis-à-vis de la durabilité :

$\rightarrow c_{min,dur}$ (tableau 4.4 ou 4.5NF)

- Modulations compte tenu de l'objectif d'adhérence, de protections (type d'acier, revêtement,…), marge complémentaire, épaisseur sacrificielle éventuelle en cas d'abrasion

$c_{min,b}$ et modulations $c_{min,dur} + \Delta c_{dur} \rightarrow c_{min}$

- Prise en compte de la tolérance d'exécution

$c_{min} + \Delta c_{dev} \rightarrow c_{nom}$

Points d'attention

1. Choix des classes d'exposition vis-à-vis de l'enrobage

ne pas choisir inutilement une classe "enveloppe"
veiller à balayer l'ensemble des risques

2. Choix de la D.U.P.

100 ans par défaut pour les ouvrages de génie civil (A.N. de l'EN 1990) rappelé dans le futur fascicule 65

3. Utilisation raisonnée des modulations

- expliciter les hypothèses introduites lorsqu'elles permettent de bénéficier de Δc ou modulations de classe favorables
- valider ces hypothèses pour chaque intervenant en prévoyant d'éventuelles interactions et itérations (choix du béton et fabrication)
- traçabilité dans le projet (rappelé dans le futur fascicule 65) dès lors que $\Delta c_{dev} < 10$ mm

Corrosion induite par carbonatation (XC)

- **"Sont à classer en XC4 les parties aériennes des ouvrages d'art"**

S'appuie sur le calibrage avec un lot important d'ouvrages (A26)

Tient compte des minimums de c/e plutôt faibles dans l'EN 206-1 pour la classe XC3

- **XC3 pour les surfaces des hourdis protégées par une étanchéité**
- **pour les fondations : XC2 au moins**

Application brutale du tableau 4.4 (sans modulation associée à des indicateurs de durabilité appropriés)

Pont BA XC4 en C30/37 : $c_{min,dur}$ = 40 mm soit c_{nom} = 45 à 50 mm

Pour retrouver la valeur usuelle de c_{nom} = 30 mm il faut :

- Augmenter la résistance du béton, adapter le liant et/ou justifier d'un indicateur de durabilité approprié suffisant (cf. guide approche performantielle : porosité < 13 % et $K_{gaz} < 150.\ 10^{-18}$ m²)
- Pour les parties concernées, justifier de « l'enrobage compact »
- Limiter la marge pour tolérances d'exécution par les mesures appropriées

Corrosion induite par les chlorures marins (XS)

Rappel de l'interprétation

"XS3… éléments de structure en zone de marnage et/ou exposés aux embruns lorsqu'ils sont situés à moins de 100 m de la côte, parfois plus, jusqu'à 500 m, suivant la topographie particulière"

"XS1… éléments de structure situés au-delà de la zone de classement XS3 et situés à moins de 1 km de la côte, parfois plus, jusqu'à 5 km, lorsqu'ils sont exposés à un air véhiculant du sel marin, suivant la topographie particulière"

XS2 : immergé en permanence

Application brutale du tableau 4.4 (sans modulation associée à des indicateurs de durabilité appropriés)

Pont BA XS3 en C35/45 : $c_{min,dur}$ = 55 mm en C45/55 : $c_{min,dur}$ = 50 mm
en C70/85 : $c_{min,dur}$ = 45 mm

Pont BP XS3 en C35/45 : $c_{min,dur}$ = 65 mm en C45/55 : $c_{min,dur}$ = 60 mm
en C70/85 : $c_{min,dur}$ = 55 mm

Pour se rapprocher de la valeur usuelle c_{nom} = 50 mm il faut :

- Augmenter la résistance du béton ou justifier d'indicateurs de durabilité appropriés suffisants (cf. guide approche performantielle : porosité < 11 %, $K_{gaz} < 150.\ 10^{-18}$ m² et $D_{app\ Cl^-} < 3.\ 10^{-12}$ m²/s)
- Pour les parties concernées, justifier de « l'enrobage compact »
- Limiter la marge pour tolérances d'exécution par les mesures appropriées

Gel et sels de déverglaçage (XF, XD)

- **Méthodologie figée pour le calcul de l'enrobage** : tableau, AN de l'EN 1992-1-1 en note 6 au tableau 4.1, clause 4.2 (2)

XF1, salage peu fréquent → XC4

XF2, salage fréquent → XD1 / XD3* (éléments très exposés)

XF3, salage peu fréquent → XC4 si béton sans entraîneur d'air

→ XD1 si béton formulé avec entraîneur d'air

XF4, salage fréquent → XD2 / XD3* (éléments très exposés)

XF4, salage très fréquent → XD3

Parties très exposées pour les ponts : corniches, longrines d'ancrage des dispositifs de retenue, solins des joints de dilatation

+ parties à 6 m de la chaussée (sens horizontal et au-dessus)

- **Application "brutale" (sans modulation associée à des indicateurs de durabilité appropriés)**

Corniche ou longrine BA, gel sévère salage fréquent (XF4) : béton > C35/45 et $c_{min,dur}$ 55 mm

→ peut tendre à favoriser des dispositions complémentaires de protection

Attaques chimiques (XA)

Nécessité d'étude particulière

Correspondance XAi - XDi indicative uniquement

L'agressivité pour le béton ne se transpose pas forcément directement pour l'armature : clause 4.4.1.2 (12)

Risque d'abrasion (XM)

Traitement particulier : épaisseur sacrificielle

Classes XM1 à XM3 liées à l'agressivité (exemples : trafic d'engins)

Clause 4.4.1.2 (13) Épaisseur sacrificielle k_1 (5 mm) à k_3 (15 mm)

Objectifs d'épaisseur d'enrobage

- **Rappel de l'objectif de qualité de bétonnage**

  4.4.1.2 (5) c_{nom} > dimension nominale du plus gros granulat

- **Rappel de l'objectif de maîtrise de la fissuration**

  4.4.1.2 (5) éviter c_{nom} > 50 mm

Ces objectifs (constants dans la réglementation française) sont ici peu visibles. Le second justifie l'utilisation des modulations de classe structurale (**tableau 4.3 NF, avec notamment la possibilité de moduler de 2 classes grâce à l'application de l'approche performantielle**) et les modulations "Δc" liées à une protection supplémentaire (revêtement ou armature auto-protégée)

Usage du tableau 4.3NF : principales modulations

- **Durée d'utilisation de projet**

S4 pour les bâtiments et ouvrages de GC courants

S6 pour les ponts (100 ans AN EN1990), S3 pour ouvrages provisoires

Critère	**Classe d'exposition selon tableau 4.1**						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1 / XS1 / XA1[3)]	XD2 / XS2 / XA2[3)]	XD3 / XS3 / XA3[3)]
Durée d'utilisation de projet	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2
	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1

Usage du tableau 4.3NF : principales modulations

- **Classe de résistance (indicateur de durabilité "simplifié")**

  minoration de 1 (en général 2 classes au-dessus du minimum EN 206)

  + éventuelle modulation "nature du liant" vis-à-vis de la carbonatation

  minoration de 2 (en général 6 classes au-dessus du minimum EN 206)

  cette modulation doit permettre la valorisation des BHP et BTHP, notamment en environnement agressif

- **Sur justification, un autre indicateur de durabilité que la résistance peut être utilisé. C'est précisément un des objets du guide LCPC 2010 « approche performantielle » qui autorise de minorer de 2 sous réserve de l'atteinte des indicateurs appropriés.**

Critère	**Classe d'exposition selon tableau 4.1**						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1 / XS1 / XA1[3)]	XD2 / XS2 / XA2[3)]	XD3 / XS3 / XA3[3)]
Classe de résistance[1)]	≥ C30/37 : minoration de 1	≥ C30/37 : minoration de 1	≥ C30/37 : minoration de 1	≥ C35/45 : minoration de 1	≥ C40/50 : minoration de 1	≥ C40/50 : minoration de 1	≥ C45/55 : minoration de 1
	≥ C50/60 : minoration de 2	≥ C50/60 : minoration de 2	≥ C55/67 : minoration de 2	≥ C60/75 : minoration de 2	≥ C60/75 : minoration de 2	≥ C60/75 : minoration de 2	≥ C70/85 : minoration de 2

Usage du tableau 4.3NF : principales modulations

- ## Enrobage compact

Attention interprétation restrictive (les 3 items de la note 2)

face coffrée des éléments préfabriqués ou coulés sur coffrages industriels, sous-face des dalles de ponts (si accessibilité à la vibration)

résulte du calibrage effectivement favorable dans ces cas (compacité, cure…)

Critère	**Classe d'exposition selon tableau 4.1**						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1 / XS1 / XA1[3)]	XD2 / XS2 / XA2[3)]	XD3 / XS3 / XA3[3)]
Enrobage compact[2)]	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1	Minoration de 1

Note 2 : Ce critère s'applique dans les éléments pour lesquels une bonne compacité des enrobages peut être garantie :

- Face coffrée des éléments plans (assimilables à des dalles, éventuellement nervurées), coulés horizontalement sur coffrages industriels.
- Éléments préfabriqués industriellement : éléments extrudés ou filés, ou faces coffrées des éléments coulés dans des coffrages métalliques
- **Sous face des dalles de pont, éventuellement nervurées, sous réserve de l'accessibilité du fond de coffrage aux dispositifs de vibration.**

De $c_{min,dur}$ à c_{nom} : principales autres modulations

- **$\Delta c_{dur,st}$** clause 4.4.1.2 (7) AN

  Utilisation d'acier résistant à la corrosion : 0 sauf justification de l'auto-protection sur la durée d'utilisation de projet. Nécessite justification spéciale

  Position basée sur le manque d'expérience en France, la difficulté de spécification appropriée, la prise en compte des caractéristiques propres de ces aciers.

- **$\Delta c_{dur,add}$** clause 4.4.1.2 (8) AN

  Effet d'un revêtement : 0 sauf revêtement adhérent dont la protection est justifiée sur la durée d'utilisation de projet. Nécessite justification spéciale

- **Δc_{dev}** clause 4.4.1.3 (3) AN

  Marge pour tolérances d'exécution : **10 mm par défaut** (se veut un repoussoir)

  Réduction jusqu'à 5 mm si assurance qualité avec mesures de l'enrobage

  (le texte voudrait y inciter - à voir selon les conditions de réalisation)

  Réduction jusqu'à 0 mm sous conditions détaillées très strictes

  couvrant toutes les phases de la conception à l'exécution

EN CONCLUSION : CE QUE I'EC2 CHANGE…

Les enrobages découlent des objectifs de durabilité (classe structurale) et des contraintes associées (exposition)

Eléments fixés sous la responsabilité du maître d'ouvrage

Démarche de type performantiel avec nécessité de conseil technique (maîtrise d'œuvre ? Ou AMO ?) - bien explorée dans des cas de concessions

Cette explicitation doit être nettement anticipée

Incidence sur le projet !

Se laisser la possibilité d'itérations organisées sur les moyens de la durabilité (revêtement, armature, résistance et indicateurs de durabilité du béton…)

L'Eurocode change la démarche de détermination de l'enrobage, mais pas trop la valeur finale si on utilise un béton adapté :

Cohérence EN 206 - EN 1992 – approche performantielle !

Un enjeu patrimonial important

Veiller à la cohérence entre hypothèses du projet et réalisation (performances béton, mise en œuvre, tolérances…).

CE QUE ÇA CHANGE…

plus jamais ça ? !

Ou du moins,

pas avant la fin de la DUP…